

Europäisches Patentamt  
European Patent Office  
Office européen des brevets



(11) EP 0 951 132 A2

(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:  
20.10.1999 Patentblatt 1999/42

(51) Int Cl.<sup>6</sup> H02K 15/12

(21) Anmeldenummer: 99810257.8

(22) Anmeldetag: 23.03.1999

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU  
MC NL PT SE  
Benannte Erstreckungsstaaten:  
AL LT LV MK RO SI

- Fried, Reinhard  
5415 Nussbaumen (CH)
- Joho, Reinhard  
5024 Küttigen (CH)
- Oesterheld, Jörg, Dr.  
5442 Fislisbach (CH)

(30) Priorität: 18.04.1998 DE 19817287

(71) Anmelder: ABB RESEARCH LTD.  
8050 Zürich (CH)

(74) Vertreter: Kaiser, Helmut et al  
ABB Business Services Ltd  
Intellectual Property (SLE-I)  
5401 Baden (CH)

(72) Erfinder:  
• Baumann, Thomas, Dr.  
5430 Wettingen (CH)

(54) **Wicklungsstab für die Hochspannungswicklung einer elektrischen Maschine sowie Verfahren zur Herstellung eines solchen Wicklungsstabes**

(57) Bei einem Wicklungsstab (10) für die Hochspannungswicklung, insbesondere Statorwicklung, einer elektrischen Maschine, welcher eine Mehrzahl von Leitern (13) umfasst, welche über- und/ oder nebeneinander angeordnet sind und ein Leiterbündel mit einem rechteckigen Querschnitt bilden, wobei das Leiterbündel aussen von einer Isolierung (14) umgeben ist, wird

ohne Aenderung der Isolierungsdicke insgesamt eine verbesserte elektrische Festigkeit an den Kanten dadurch erreicht, dass die Dicke (d2) der Isolierung (14) an den Kanten (15) des Wicklungsstabes (10) grösser ist als die Dicke (d1) der Isolierung (14) an den Flachseiten des Wicklungsstabes (10).

Zur Ausformung des Kantenbereiches wird dabei vorzugsweise ein Kalibrierungsprozess verwendet.

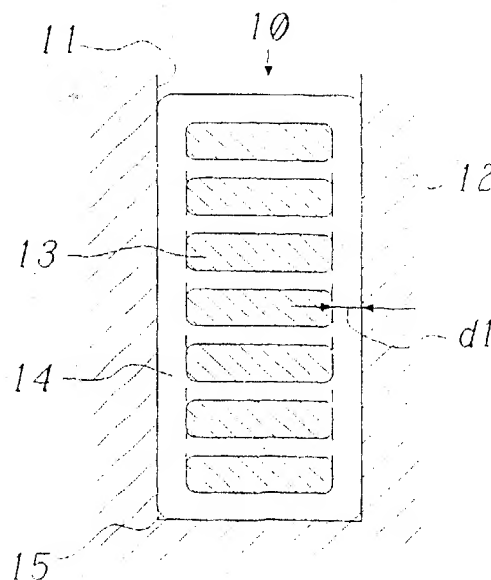


Fig. 3

0 951 132 A2

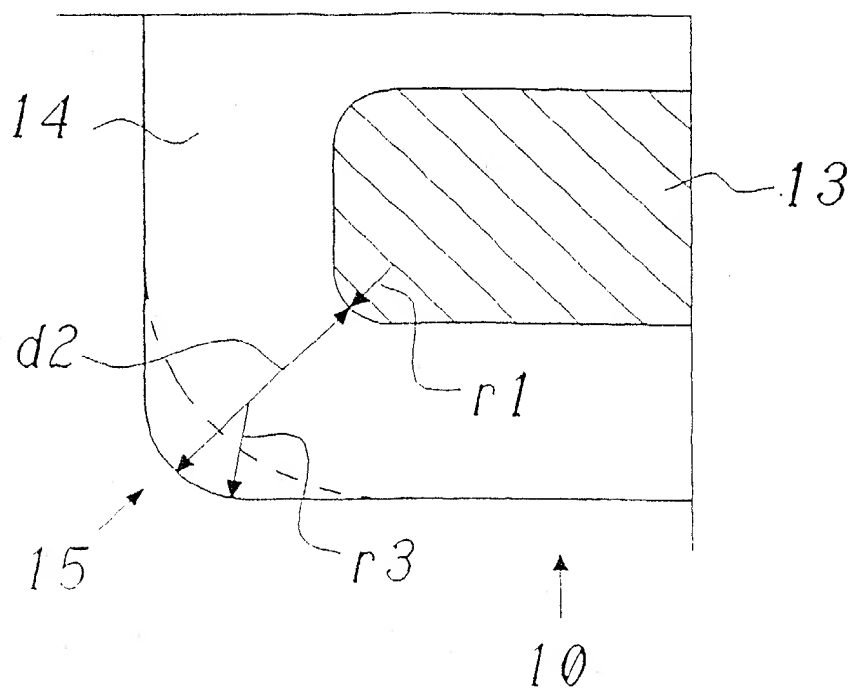


Fig. 4

## Beschreibung

## TECHNISCHES GEBIET

[0001] Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf das Gebiet der elektrischen Maschinen. Sie betrifft einen Wicklungsstab für die Hochspannungswicklung, insbesondere Statorwicklung, einer elektrischen Maschine, umfassend eine Mehrzahl von Leitern, welche über- und/ oder nebeneinander angeordnet sind und ein Leiterbündel mit einem rechteckigen Querschnitt bilden, wobei das Leiterbündel aussen von einer Isolierung umgeben ist.

[0002] Die Leiter können dabei elektrisch parallel liegen (Stabwicklung) oder untereinander seriengeschaltet sein (Spulenwicklung). Die Spannung zwischen den Leitern ist aber im Normalbetrieb bedeutend kleiner als diejenige über der Stabisolierung.

[0003] Die Erfindung betrifft weiterhin ein Verfahren zum Herstellen eines solchen Wicklungsstabes.

## STAND DER TECHNIK

[0004] Wicklungsstäbe, wie sie beispielsweise in Statoren von rotierenden elektrischen Maschinen Verwendung finden, haben häufig den in Fig. 1 dargestellten beispielhaften Querschnitt. Der Wicklungsstab 10, der in eine dafür vorgesehene Nut 11 im Statorpaket 12 eingelegt ist, umfasst ein Bündel von einzelnen Leitern 13, die parallel über- und/ oder nebeneinander verlaufend angeordnet sind. Das Leiterbündel, das in aller Regel einen rechteckigen Querschnitt mit Kanten 15 aufweist, ist allseitig von einer Isolierung 14 umgeben. Bedingt durch die Form ist das elektrische Feld an den Kanten 15 grösser als auf den Flachseiten des Wicklungsstabes 10. Dementsprechend ist die Kantenregion besonders anfällig gegen elektrischen Durchbruch bzw. elektrisches Langzeitversagen.

[0005] Zur Erzielung bestmöglicher Nuffüllung mit Leitermaterial und bestmöglichem Wärmeübergang über die Stabisolierung wird nach möglichst dünner Isolierung, zumindest an den flächenmassig dominierenden Flachseiten des Stabes gestrebt. Die herkömmliche Herstellung der Isolierung 14 bei Wicklungsstäben mit rechteckigem Querschnitt ist beispielsweise in "Sequenz: Herstellung der Wicklungen elektrischer Maschinen", Springer-Verlag 1973, Seite 128-129, beschrieben. Danach werden Bänder von Glimmerpapier, welches zur Erhöhung der Zug- und Einreissfestigkeit auf einen Träger von Glasgewebe kaschiert ist, lagenförmig um den Stab bzw. das Leiterbündel gewickelt, anschliessend mit Kunststoffharz getränkt, eingeformt und bei erhöhten Temperaturen ausgehärtet. Die Dicke ( $d_1$  in Fig. 1) der Isolierung 14 ist bei diesem Verfahren auf allen Flachseiten des Wicklungsstabes 10 in etwa gleich. An den Kanten 15 weist sie theoretisch dieselbe Dicke  $d_1$  auf (siehe vergrösserten Teilausschnitt in Fig. 2), wird jedoch in der Praxis geringer infolge des lokal erhöhten Anpressdruckes (kleine Auflagefläche im Kantenbereich) der entsteht, wenn das Band mit gleichbleibendem Wickelzug und gleichbleibender Geschwindigkeit um das Leiterbündel gewickelt wird. Nach der Formel für koaxiale Zylinder kann das elektrische Maximalfeld an den Kanten 15 angegeben werden als

$$E_{\max} = \frac{U}{r_1 \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}} - \frac{U}{r_1 \cdot \ln \frac{r_1 + d^*}{r_1}}$$

Dabei sind (gemäss Fig. 2)  $U$  die Belastungsspannung,  $r_1$  der innere Krümmungsradius der Isolation 14,  $r_2$  der äussere Krümmungsradius der Isolation 14, und  $d^*$  die (meist gegenüber  $d_1$  reduzierte) Dicke der Isolation 14 im Bereich der Kanten 15. Hieraus ist ersichtlich, dass das elektrische Feld, welches an der Kante 15 bei technisch einfach zu realisierenden Radien  $r_1 \leq 3$  mm sowieso schon deutlich höher ist als im Bereich der Flachseiten, nochmals zunehmen wird als Folge der reduzierten Isolierungsdicke  $d^*$ , wie sie sich bei vielen Herstellungsverfahren ergibt.

[0006] Die Auswirkungen der erhöhten Feldstärke können insbesondere bei elektrischer Dauerbelastung beträchtlich sein, da die Versagensrate  $t^{-1}$  stark überlinear mit dem elektrischen Feld wächst. Es gilt grob ein Potenzgesetz zwischen der Lebenszeit  $t$  (in h) und dem elektrischen Feld  $E$  (in kV/mm) gemäss

$$\frac{t}{t_0} = K \cdot \left[ \frac{E}{E_0} \right]^{-n}$$

wobei  $t_0 = 1$  h und  $E_0 = 1$  kV/mm sind. Für einen Lebensdauerexponenten  $n = 8$  (dies ist ein häufiger Wert bei Isoliermaterialien für rotierende elektrische Maschinen nach dem Stand der Technik) bedeutet dies z.B., dass eine Erhöhung

der Feldstärke um 20% die Lebensdauer auf weniger als  $\frac{1}{4}$  verringert, umgekehrt aber eine Erniedrigung des Feldes um 20% die Lebensdauer um einen Faktor von etwa 6 erhöht.

[0007] Eine Erniedrigung der Kantenfeldstärke liesse sich nun beispielsweise dadurch erreichen, dass man von einer Isolierung 14 mit konstanter Dicke  $d_1$  ( $= d^*$ ), wie sie in Fig. 1 bzw. Fig. 2 gezeigt ist, auf eine Isolierung mit eckiger Aussenkontur ( $r_2 = 0$ ) überginge. Wenn man unter dieser Annahme für einen Wert von  $d_1 = 2.5$  mm und  $r_1 = 2.5$  mm eine auf dem Finite-Elemente-Verfahren basierende Computermodellrechnung durchführt, ergibt sich eine Reduktion der maximalen Feldstärke  $E_{\max}$  im Kantenbereich von 11%, was bei einem Lebensdauerexponenten von 8 einer rechnerischen Lebensdauerverlängerung um den Faktor 2.5 entspricht. Dieser Faktor erhöht sich überproportional mit höherem Lebensdauerexponenten (z.B. Faktor 4 bei  $n = 12$ ).

#### DARSTELLUNG DER ERFINDUNG

[0008] Es ist Aufgabe der Erfindung, einen Wicklungsstab zu schaffen, bei welchem mit einfachen Mitteln eine deutliche Verringerung der Maximalfeldstärke im Kantenbereich erzielt wird, ohne dass die Dicke der Isolierung im Bereich der Flachseiten erhöht werden muss, sowie ein Verfahren zu dessen Herstellung anzugeben.

[0009] Die Aufgabe wird bei einem Wicklungsstab der eingangs genannten Art dadurch gelöst, dass die Dicke der Isolierung an den Kanten des Wicklungsstabes grösser ist als die Dicke der Isolierung an den Flachseiten des Wicklungsstabes. Durch die Vergrösserung der Isolierungsdicke im Kantenbereich ergibt sich eine Entzerrung der Feldlinien des elektrischen Feldes, die zu der gewünschten Reduzierung der Kantenfeldstärke führt.

[0010] Eine erste bevorzugte Ausführungsform des erfindungsgemässen Wicklungsstabes ist dadurch gekennzeichnet, dass die Isolierung an den Kanten des Wicklungsstabes eine Krümmung mit einer inneren Krümmungskontur und einem äusseren Krümmungsradius aufweist, und dass der äussere Krümmungsradius kleiner ist als die Summe aus dem äquivalenten inneren Krümmungsradius der inneren Krümmungskontur und der Dicke der Isolierung an den Flachseiten des Wicklungsstabes. Durch die Beibehaltung eines von Null verschiedenen äusseren Krümmungsradius ergibt sich eine für die Feldverteilung und für die mechanische Stabilität günstige gleichmässige Aenderung der Dicke im Kantenbereich.

[0011] Grundsätzlich lässt sich eine derartige Formung der Kantenbereiche mit einer gewickelten Isolierung erreichen, wenn für die Isolierung thermoplastische Bänder verwendet werden. Besonders einfach wird die Formung jedoch dann, wenn gemäss einer zweiten bevorzugten Ausführungsform die Isolierung aus einem thermoplastischen Polymer besteht, in welchem Füllstoffpartikel aus einem Isolierstoff verteilt sind. In einer bevorzugten Weiterbildung dieser werden als thermoplastisches Polymer Polyetheretherketon (PEEK) und als Füllstoffpartikel Glimmerplättchen verwendet. Anstelle des PEEK können aber mit gutem Erfolg auch andere Stoffe wie z.B. Polysulfon (PSU) oder Polyäthersulfon (PES) verwendet werden.

[0012] Gemäss einer weiteren bevorzugten Ausführungsform der Erfindung wird die zur Reduktion der Kantenfeldstärke eingesetzte spezielle Formgebung der Isolierung im Kantenbereich auch auf die Leiter des von der Isolierung umgebenen Leiterbündels ausgedehnt, dadurch, dass zumindest die im Bereich der Kanten angeordneten Leiter jeweils aus einem Bündel einzelner, isolierter, insbesondere miteinander verseilter Drähte bestehen. Hierdurch wird es möglich, die Leiter selbst durch Formpressen in eine Form zu bringen, die zu einer weiteren Erhöhung der Isolierungsdicke im Kantenbereich führt. Die Drähte können dabei beispielsweise als Runddrähte ausgebildet sein, aber auch (nach Art von Miniatur-Roebelstäben) vierkantig sein.

[0013] In einer bevorzugten Weiterbildung dieser Ausführungsform sind die Bündel aus den Drähten zur Erzielung einer glatten Aussenkontur mit einer halbleitenden Bindemasse imprägniert, und ist in dem Bündel aus Drähten zur Ankopplung an die halbleitende Bindemasse wenigstens ein Draht blank belassen oder blank gemacht. Hierdurch ist es möglich, einen ungünstigen Einfluss der Drahtbündel auf die Feldverteilung zu minimieren. Ueber die Glättung der Aussenkontur eines einzelnen Leiters hinaus kann die Aussenkontur des gesamten Leiterbündels geglättet werden, wenn gemäss einer weiteren Ausführungsform die Leiter des Wicklungsstabes voneinander durch Zwischenräume beabstandet sind, und die Zwischenräume mit einer halbleitenden Ueberbrückungsmasse gefüllt sind, die vorzugsweise (in Stabrichtung) ein zumindest abschnittsweise nichtlineares, spannungsbegrenzendes Verhalten aufweist.

[0014] Das erfindungsgemässe Verfahren zum Herstellen eines Wicklungsstabes, bei welchem Wicklungsstab die Isolierung im wesentlichen aus einem thermoplastischen Material besteht, ist dadurch gekennzeichnet, dass der Wicklungsstab nach dem Aufbringen der Isolierung einem Kalibrierprozess unterzogen wird, bei welchem dem verformbaren Material der Isolierung eine vorgegebene Randkontur aufgeprägt wird, welche zu einer erhöhten Dicke der Isolierung im Bereich der Kanten führt. Durch die Entkopplung von Auftrags- und Formungsprozess lassen sich die beiden Prozessschritte getrennt optimieren und gleichzeitig kontinuierlich durchführen. Die Isolierung lässt sich dabei in besonders gleichmässigen und gut formbaren Schichten aufbringen, wenn gemäss einer ersten bevorzugten Ausführungsform des erfindungsgemässen Verfahrens die Isolierung durch ein Verfahren aus der Reihe der Pulverbeschichtungsverfahren, insbesondere Sprühsintern oder thermisches Spritzen, und Extrusionsverfahren aufgebracht wird.

[0015] Das erfindungsgemässe Verfahren lässt sich besonders schnell und präzise durchführen, wenn gemäss einer

weiteren bevorzugten Ausführungsform zum Durchführen des Kalibrierprozesses Kalibrierwalzen, welche parallel zu den Mittelebenen des Wicklungsstabes und in einem festen Abstand davon angeordnet sind, relativ zum Wicklungsstab über dessen Oberflächen bewegt werden, und innerhalb des Kalibrierprozesses mittels zusätzlicher Kantenrollen den Kanten des Wicklungsstabes ein vorgegebener Krümmungsradius aufgeprägt wird.

[0016] Weitere Ausführungsformen ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen

#### KURZE ERLÄUTERUNG DER FIGUREN

[0017] Die Erfindung soll nachfolgend anhand von Ausführungsbeispielen im Zusammenhang mit der Zeichnung näher erläutert werden. Es zeigen

Fig. 1 im Querschnitt einen in eine Statornut eingelegten Wicklungsstab nach dem Stand der Technik mit einer gewickelten Isolierung mit im wesentlichen konstanter Dicke  $d_1$ ;

Fig. 2 einen Ausschnitt im Kantenbereich des Wicklungsstabes nach Fig. 1;

Fig. 3 die zu Fig. 1 vergleichbare Darstellung eines ersten Ausführungsbeispiels der Erfindung, bei welchem durch Verringerung des äusseren Krümmungsradius  $r_3$  der Isolierung an der Kante die Dicke der Isolierung in diesem Bereich erhöht wird;

Fig. 4 eine zu Fig. 2 vergleichbare Darstellung des Kantenausschnitts von Fig. 3;

Fig. 5 eine zu Fig. 3 vergleichbare Darstellung eines zweiten Ausführungsbeispiels der Erfindung, bei welchem zur weiteren Erhöhung der Isolierungsdicke im Kantenbereich der angrenzende Leiter stärker abgerundet wird;

Fig. 6 eine zu Fig. 4 vergleichbare Darstellung des Kantenausschnitts von Fig. 5;

Fig. 7 eine schematisierte Darstellung der beim Kalibrierungsvorgang nach der Erfindung auftretenden Effekte; und

Fig. 8 in einer perspektivischen Darstellung ein Ausführungsbeispiel des Kalibrierprozesses nach dem erfindungsgemassen Verfahren.

#### WEGE ZUR AUSFÜHRUNG DER ERFINDUNG

[0018] In den Fig. 3 und 4 ist ein erstes bevorzugtes Ausführungsbeispiel des Wicklungsstabes nach der Erfindung im Querschnitt wiedergegeben. Die Vergrösserung der Dicke der Isolierung 14 des Wicklungsstabes 10 im Bereich der Kanten 15 wird in diesem Fall dadurch erreicht, dass der Krümmungsradius  $r_3$  an der Aussenseite der Isolierung 14 kleiner gewählt wird als die Summe aus dem Krümmungsradius  $r_1$  auf der Innenseite der Isolierung 14 (bzw. des Leiters 13) und der Dicke  $d_1$  der Isolierung auf den Flachseiten der Isolierung (siehe Fig. 3). Dadurch ergibt sich im Vergleich zum herkömmlichen Fall aus Fig. 1 und 2 (in Fig. 4 strichliert eingezeichnet) eine Dicke  $d_2$  der Isolierung 14 im Kantenbereich, die grösser ist als die Dicke  $d_1$ . Für den Extremfall mit  $r_3 = 0$  (scharfe Aussenkante der Isolierung 14) ist die Dicke  $d_2$  maximal

$$d_{2_{\max}} = \left[ \sqrt{2} (r_1 + d_1) \right] - r_1$$

Sei z.B.  $r_1 = 2.5 \text{ mm}$  und  $d_1 = 4 \text{ mm}$ , so ergibt sich  $d_{2_{\max}} = 6.69 \text{ mm}$ , was einer Steigerung der maximalen Isolationsdicke an der Kante 15 um 67% gegenüber dem Wert  $d_1$  auf den Flachseiten entspricht.

[0019] Ausgehend vom konventionellen Wickel- und Tränkprozess als Herstellungsverfahren von Isolierungen für die Leiter in rotierenden elektrischen Maschinen sind scharfe Aussenkanten für die Isolierung 14 theoretisch machbar durch eine Deformation der Isolierung im imprägnierten, aber noch nicht ausgehärteten Zustand. Dies setzt eine Fließfähigkeit der Isolierung voraus. Da jedoch der üblicherweise verwendete Glsträger des Glimmerbandes sehr zugfest ist, wird ein hinreichender Fluss der Isolierung nur dann stattfinden, wenn das Glas/Glimmerband sehr lose um den Leiterstab gewickelt ist (Wickelzug annähernd gleich 0). Eine derartige Isolierung hat jedoch den Nachteil, dass die Bandlagen extrem leicht verrutschen. Falten bilden können und somit eine gleichmässige Bewicklung des Leiterbündels nicht mehr gewährleistet ist. Eine gleichmässige Bewicklung ist aber ein Grundvoraussetzung für eine homogene und funktionsfähige Isolierung.

[0020] Eine hinreichend deformierbare Isolation ist nur dann zu erwarten, wenn ein Herstellungsverfahren für die

Isolierung 14 gewählt wird, bei dem kein Glsträger verwendet wird. Diese Voraussetzung erfüllen beispielsweise die Pulverbeschichtungsverfahren Sprühsintern und thermisches Spritzen, Extrusionsverfahren sowie Verfahren, bei denen das Leiterbündel mit thermoplastischen Bändern umwickelt und anschliessend heiss verpresst wird (siehe dazu beispielsweise die Druckschrift EP-A2-0 660 336). Alle genannten Verfahren geben für sich genommen noch nicht notwendigerweise den gewünschten Effekt der Dickenerhöhung an den Kanten; es ist sogar denkbar, dass wenn keine zusätzlichen Vorkehrungen getroffen werden, die Dicke der Isolierung 14 an den Kanten 15 geringer ausfällt. Für die Formung der Kanten ist daher ein zusätzlicher Bearbeitungsschritt notwendig. Eine weitere notwendige Bedingung ist, dass die verwendete Isoliermasse, vorzugsweise ein Polymer, in einem weiten Temperaturbereich plastisch verformbar ist.

[0021] Die gewünschte zielgerichtete Deformation der Isoliermasse (des Polymers) im Kantenbereich lässt sich dann gemäss Fig. 7 und 8 durch ein sogenanntes Kalibrieren der Isolierung 34 kurz nach dem Aufspritzen (gilt für thermisches Spritzen) bzw. nach dem Sintern (gilt für Sprühsintern) realisieren, indem Kalibrierwalzen bzw. -rollen auf den Flächen der Isolierung entsprechend der schematisierten Darstellung in Fig. 7 in definierter Weise über das noch verformbare Isoliermaterial geführt werden. Die auf die Unterlage 26 aufgebrachte Isoliermasse 27, die neben den untergemischten Füllstoffpartikeln 29 (z. B. Glimmerplättchen) auch noch Luftblasen 28 enthält, wird dabei durch die Kalibrierwalze 31, die in definiertem Abstand über die Unterlage 26 gerollt wird, verdichtet und in der Dicke vergleichmässigt.

[0022] In einer bevorzugten Ausführungsform des Verfahrens wird die Isoliermasse durch sukzessives Auftragen (Aufspritzen) mehrerer dünner Schichten gebildet. Das Kalibrieren wird dann nach jedem Spritzvorgang durchgeführt. Es ergeben sich hierdurch zusätzlich positive Effekte aufgrund dessen, dass die eventuell vorhandene Luftblasen 28 aus der Isolierung herausgedrückt werden und dass kurzfasrige oder plättchenförmige Füllstoffpartikel 29 in eine eventuell gewünschte, gerichtete Lage parallel zur Oberfläche orientiert werden (rechte Seite Fig. 7).

#### Beispiel 1

[0023] Ein mechanisches Gemisch aus Polyetheretherketon (PEEK) und Glimmer im Mengenverhältnis 1:1 wird bei Raumtemperatur auf einen Rechteckleiter (mit Leitern 33) mittels elektrostatischem Spritzen (Untervariante des Sprühsinterverfahrens) aufgetragen. Es bleibt allseitig eine Schicht von ca. 0,2 mm Dicke haften. Der Polymeranteil des Pulvers wird durch Erwärmen in einem Umluftofen (380°C, 10 min) verschmolzen. Direkt anschliessend wird (Fig. 8) der Wicklungsstab 32 durch jeweils zwei hintereinanderliegende Walzenpaare (Kalibrierwalzen 35, 36, 37) auf beiden Stirn- und Breitseiten kalibriert. Die Kalibrierwalzen 35, 36, 37 sind dabei parallel zu den Mittelebenen 41, 42 des Wicklungsstabes 32 und in einem festen Abstand davon angeordnet. Um einen zu starken Wärmeentzug und ein dadurch bedingtes verfrühtes Verfestigen des Polymers zu vermeiden, bestehen die Rollen vorzugsweise aus Glasröhren oder einem anderen wärmefesten Material mit möglichst geringer Wärmeleitfähigkeit. Die Kalibrierung kann realisiert werden, indem entweder der Wicklungsstab 32 zwischen den feststehenden Kalibrierwalzen 35, 36, 37 hindurchgeführt wird (Pfeilrichtung in Fig. 8), oder vorteilhafter, indem die Walzen über den feststehenden Stab geführt werden (Konzept Roboter oder Wickelmaschine).

#### Beispiel 2

[0024] Wie in Beispiel 1, jedoch mit geheizten Kalibrierwalzen 35, 36, 37. Die Walzentemperatur beträgt dabei etwa 330°C.

#### Beispiel 3

[0025] Ein mechanisches Gemisch aus Polyetheretherketon (PEEK) und Glimmer im Mengenverhältnis 1:1 wird auf einen Rechteckleiter mittels Flammsspritzen bis zur gewünschten Enddicke aufgetragen. Der Leiter ist dabei auf etwa 180°C vorgeheizt. Das Kalibrieren erfolgt entsprechend Beispiel 1 und 2.

#### Beispiel 4

[0026] Wie Beispiel 3, jedoch wird die Enddicke nicht in einem einzigen Durchgang erreicht, sondern durch wiederholtes Spritzen und Kalibrieren dünner Schichten mit einer Dicke von ca. 0,2 mm. Dieses Vorgehen hat gegenüber Beispiel 3 den Vorteil, dass die Glimmerplättchen sich in der gewünschten Art parallel zur Oberfläche orientieren und der Blasengehalt der Isolierung praktisch auf Null zurückgeht.

Beispiel 5:

[0027] Wie Beispiel 4, jedoch werden (Fig. 8) neben den Flachseiten des Wicklungsstabes 32 auch die Kanten 40 mit speziellen Kantenrollen 38, 39 kalibriert, die in Prozessrichtung vorzugsweise hinter den Kalibrierwalzen 35, 36, 37 angeordnet sind. Hierdurch wird ein äusserer Krümmungsradius ( $r_3$  in Fig. 4) der Isolierung 34 definiert und es wird erreicht, dass die Glimmerplättchen in dem elektrisch besonders heiklen Kantenbereich in günstiger Weise ausgerichtet sind.

Beispiel 6:

[0028] Wie Beispiele 1 bis 5, jedoch wird statt des PEEK/Glimmer-Gemisches ein PEEK/Glimmer-Compound verarbeitet.

Beispiel 7:

[0029] Um einen Rechteckleiter werden Bänder, bestehend aus Polysulphon (PSU)- gefüllt mit 30 Masse-% Glimmer - gewickelt. Die Anzahl Lagen an aufgewickelten Bändern ist 5-10% grosser als es der gewünschten Isolierungsdicke entspricht. Nach dem Bewickeln erfolgt die Kalibrierung entsprechend Beispiel 2 mit geheizten Walzen. Die Walzentemperatur beträgt dabei 250°C.

[0030] Ein weiteres bevorzugtes Ausführungsbeispiel für einen Wicklungsstab nach der Erfindung ist in den Fig. 5 und 6 wiedergegeben. Der Wicklungsstab 16, der in die Nut 17 eines Statorpakets 18 eingelegt ist, umfasst eine Mehrzahl von Leitern 19, 20, 21, die von einer Isolierung 22 umgeben sind. Zumindest die äusseren Leiter 19, 21, vorzugsweise auch die anderen Leiter 20, bestehen in diesem Fall aus verseilten, isolierten Drähten 25. Die äusseren Leiter 19, 21 werden nach den Prinzipien der Feldtheorie (Rogowski-Profil) abgerundet (Krümmungsradius  $r_5$ ). Die Abrundung der Leiter 19, 21 wird durch die Strukturierung in die Drähte 25 einfach gemacht. Durch die Abrundung der Leiter 19, 21 ergibt sich gegenüber der Dicke  $d_3$  an den Flachseiten (Fig. 5) eine erhöhte Dicke  $d_4$  im Bereich der Kanten 23 (Fig. 6), die dadurch noch vorgrossert werden kann, dass der Krümmungsradius  $r_4$  an der äusseren Kante der Isolierung 22 verkleinert wird.

[0031] Die (minimale) Dicke  $d_5$  zur Schmalseite des Wicklungsstabes 16 hin lässt sich dabei nach den folgenden Formeln bestimmen.

$$d_3 = \frac{U}{E_{zul}}$$

mit der Betriebsspannung  $U$  und der maximal zulässigen Feldstärke  $E_{zul}$ . Für  $d_5$  gilt dann

$$E_{zul} = \frac{2U \sqrt{\left(\frac{a}{2 \cdot r_5}\right)^2 - 1}}{(a - 2 \cdot r_5) \ln \left[ \frac{a}{2 \cdot r_5} + \sqrt{\left(\frac{a}{2 \cdot r_5}\right)^2 - 1} \right]}$$

mit

$$a = 2 \cdot r_5 + 2 \cdot d_5$$

[0032] Durch Einsetzen der Gleichungen ineinander und Auflösen nach  $d_5$  kann dann beispielsweise die Dicke  $d_5$  in Abhängigkeit von  $d_3$  berechnet werden. Die kreisförmige Ausgestaltung ist beispielhaft angegeben. Eine noch weitergehende Optimierung hinsichtlich der Feldstärke kann durch Verwendung von nicht exakt kreisförmigen Krümmungskonturen der Leiter 19, 21 gefunden werden.

[0033] Um eine hinsichtlich der elektrischen Feldstärke günstigere glatte Aussenkontur des Leiterbündels 19, 20, 21 in der Isolierung 22 zu erzielen, können die Zwischenräume 24 zwischen den Leitern 19, 20, 21 mit einer halblei-

tenden Ueberbrückungsmasse ausgefüllt sein. Ein vergleichbarer Effekt ergibt sich, wenn der "grüne" Stab, d.h. das Leiterbündel vor der Einbettung in die Isolierung 22, mit einem halbleitenden Anstrich versehen wird. Besteht die halbleitende Ueberbrückungsmasse bzw. der halbleitende Anstrich aus einem Material, welches ein elektrisch nichtlineares Verhalten aufweist, können zusätzlich Spannungsstosswellen zwischen den Leitern 19, 20, 21 linear verteilt werden.

[0034] Eine weitere Verbesserung ergibt sich, wenn die Drähte 25, aus denen die Leiter 19, 20, 21 bestehen, nach dem Verfeilen in einer Presse komprimiert werden, um den Cu-Anteil im Leiter möglichst gross zu halten. Insbesondere ist es vom elektrischen Verhalten her günstig, wenn die aus den Drähten 25 bestehenden Leiter in eine Form gepresst und mit einer halbleitenden Bindemasse imprägniert werden. Auch hierdurch wird eine für die maximale Feldstärke wichtige glatte Aussenkontur erreicht. Die Ankopplung an die halbleitende Bindemasse wird dabei vorzugsweise dadurch bewirkt, dass wenigstens ein Runddraht blank belassen wird.

#### BEZUGSZEICHENLISTE

##### [0035]

15	10, 16	Wicklungsstab
	11, 17	Nut
	12, 18	Statorpaket
	13	Leiter
20	14, 22	Isolierung
	15, 23	Kante
	19, 20, 21	Leiter
	24	Zwischenraum
	25	Runddraht
25	26	Unterlage
	27	Isoliermasse
	28	Luftblase
	29	Füllstoffpartikel
	30	Oberfläche
30	31	Kalibrierwalze
	32	Wicklungsstab
	33	Leiter
	34	Isolierung
	35, 36, 37	Kalibrierwalze
35	38, 39	Kantenrolle
	40	Kante
	41, 42	Mittelebene
	r1...r5	Krümmungsradius
40	d*, d1...d5	Dicke (Isolierung)

#### Patentansprüche

1. Wicklungsstab (10, 16, 32) für die Hochspannungswicklung, insbesondere Statorwicklung, einer elektrischen Maschine, umfassend eine Mehrzahl von Leitern (13, 19...21, 33), welche über- und/ oder nebeneinander angeordnet sind und ein Leiterbündel mit einem rechteckigen Querschnitt bilden, wobei das Leiterbündel aussen von einer Isolierung (14, 22, 34) umgeben ist, dadurch gekennzeichnet, dass die Dicke (d2, d4) der Isolierung (14, 22, 34) an den Kanten (15, 23, 40) des Wicklungsstabes (10, 16, 32) grösser ist als die Dicke (d1, d3) der Isolierung (14, 22, 34) an den Flachseiten des Wicklungsstabes (10, 16, 32).
2. Wicklungsstab nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Isolierung (14, 22, 34) an den Kanten (15, 23, 40) des Wicklungsstabes (10, 16, 32) eine Krümmung mit einer inneren Krümmungskontur (r1, r5) und einem äusseren Krümmungsradius (r3, r4) aufweist, und dass der äussere Krümmungsradius (r3, r4) kleiner ist als die Summe aus dem äquivalenten inneren Krümmungsradius (r1, r5) der inneren Krümmungskontur und der Dicke (d1, d3) der Isolierung (14, 22, 34) an den Flachseiten des Wicklungsstabes (10, 16, 32).
3. Wicklungsstab nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die innere Krümmungskontur (r1, r5) kreisförmig ist.



4. Wicklungsstab nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die innere Krümmungskontur feldoptimiert ist.
5. Wicklungsstab nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Isolierung (14, 22, 34) aus einem thermoplastischen Polymer besteht, in welchem Füllstoffpartikel (29) aus einem Isolierstoff verteilt sind.
6. Wicklungsstab nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass als thermoplastisches Polymer Polyetheretherketon (PEEK) und als Füllstoffpartikel (29) Glimmerplättchen verwendet werden.
7. Wicklungsstab nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass zumindest die im Bereich der Kanten (23) angeordneten Leiter (19, 21) jeweils aus einem Bündel einzelner, isolierter, insbesondere miteinander verseilter, Drähte (25) bestehen.
8. Wicklungsstab nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Bündel aus den Drähten (25) zur Erzielung einer glatten Aussenkontur mit einer halbleitenden Bindemasse imprägniert sind.
9. Wicklungsstab nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Leiter (13, 19, 21, 33) des Wicklungsstabes (10, 16, 32) voneinander durch Zwischenräume (24) beabstandet sind, und dass die Zwischenräume (24) zur Erzielung einer glatten Aussenkontur mit einer halbleitenden Ueberbrückungsmasse gefüllt sind.
10. Wicklungsstab nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass in dem Bündel aus Drähten (25) zur Ankopplung an die halbleitende Bindemasse wenigstens ein Draht (25) blank belassen oder gemacht ist.
11. Wicklungsstab nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass die halbleitende Ueberbrückungsmasse in Stabrichtung ein zumindest abschnittsweise nichtlineares, spannungsbegrenzendes Verhalten aufweist.
12. Verfahren zum Herstellen eines Wicklungsstabes nach Anspruch 1, bei welchem Wicklungsstab (10, 16, 32) die Isolierung (14, 22, 34) im wesentlichen aus einem thermoplastischen Material besteht, dadurch gekennzeichnet, dass der Wicklungsstab (10, 16, 32) nach dem Aufbringen der Isolierung (14, 22, 34) einem Kalibrierprozess unterzogen wird, bei welchem dem verformbaren Material der Isolierung (14, 22, 34) eine vorgegebene Randkontur aufgeprägt wird, welche zu einer erhöhten Dicke (d2, d4) der Isolierung (14, 22, 34) im Bereich der Kanten (40) führt.
13. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass die Isolierung (14, 22, 34) durch ein Verfahren aus der Reihe der Pulverbeschichtungsvorfahren, insbesondere Sprühsintern oder thermisches Spritzen, und Extrusionsverfahren aufgebracht wird.
14. Verfahren nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass die Isolierung (14, 22, 34) in mehreren Schichten, insbesondere dünnen Schichten von weniger als 1 mm, vorzugsweise etwa 0,2 mm, Dicke nacheinander aufgebracht wird.
15. Verfahren nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, dass der Kalibrierprozess nach dem Aufbringen jeder einzelnen Schicht durchgeführt wird.
16. Verfahren nach einem der Ansprüche 12 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass zum Durchführen des Kalibrierprozesses Kalibrierwalzen (35, 36, 37) welche parallel zu den Mittelebenen (41, 42) des Wicklungsstabes (10, 16, 32) und in einem festen Abstand davon angeordnet sind, relativ zum Wicklungsstab (10, 16, 32) über dessen Oberflächen (30) bewegt werden.
17. Verfahren nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, dass innerhalb des Kalibrierprozesses mittels zusätzlicher Kantenrollen (38, 39) den Kanten (15, 23, 40) des Wicklungsstabes (10, 16, 32) ein vorgegebener Krümmungsradius (r3, r4) aufgeprägt wird.
18. Verfahren nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, dass die Kantenrollen (r3, r4) in Prozessrichtung hinter den Kalibrierwalzen (35, 36, 37) angeordnet sind.
19. Verfahren nach einem der Ansprüche 12 bis 18, dadurch gekennzeichnet, dass die Isolierung (14, 22, 34) bei erhöhten Temperaturen aufgebracht wird und der Kalibrierprozess durchgeführt wird, solange sich die aufgebrachte Isolierung (14, 22, 34) noch auf erhöhten Temperaturen befindet.

**EP 0 951 132 A2**

20. Verfahren nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, dass Kalibrierwalzen (35, 36, 37) bzw. Kalibrierrollen (38, 39) verwendet werden, welche aus einem Material mit kleiner Wärmeleitfähigkeit, insbesondere einem Glas, bestehen.

5 21. Verfahren nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, dass Kalibrierwalzen (35, 36, 37) bzw. Kalibrierrollen (38, 39) verwendet werden, welche während des Kalibrierprozesses auf erhöhte Temperaturen aufgeheizt sind.

10

15

20

25

30

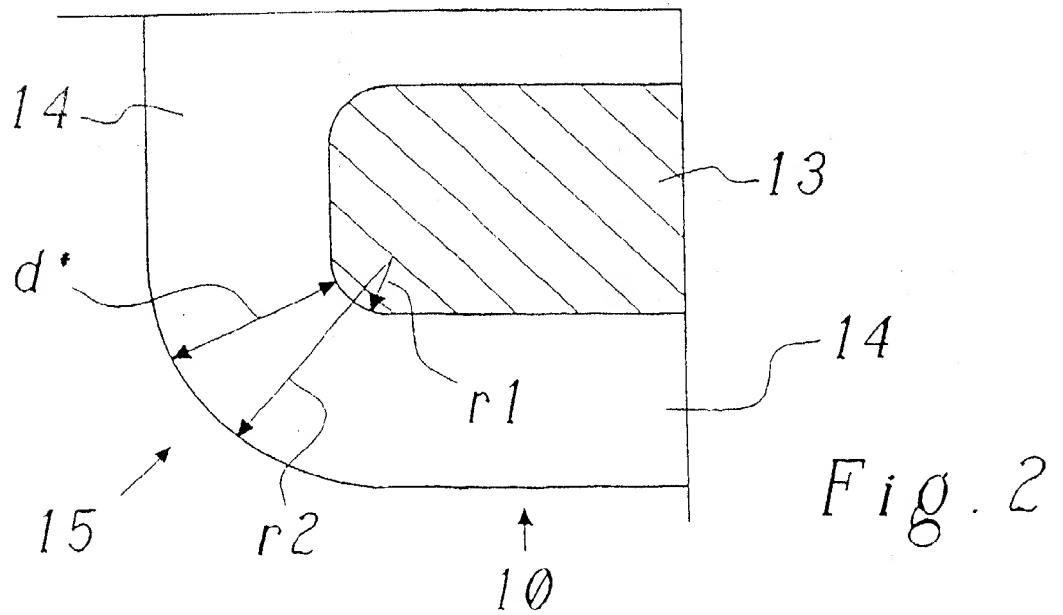
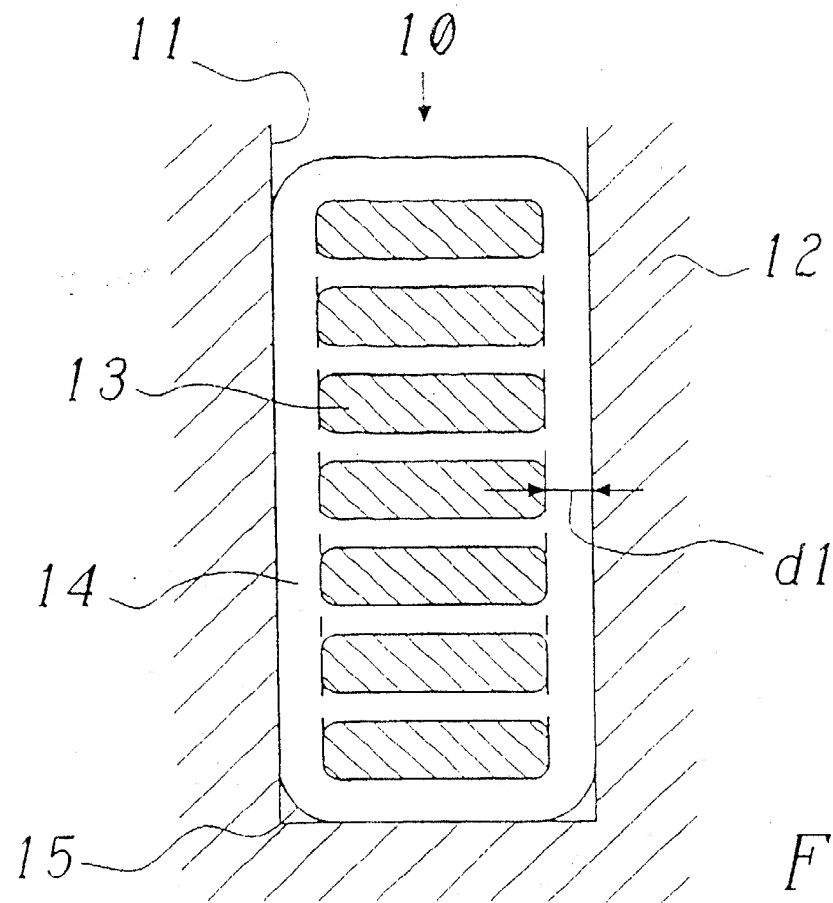
35

40

45

50

55



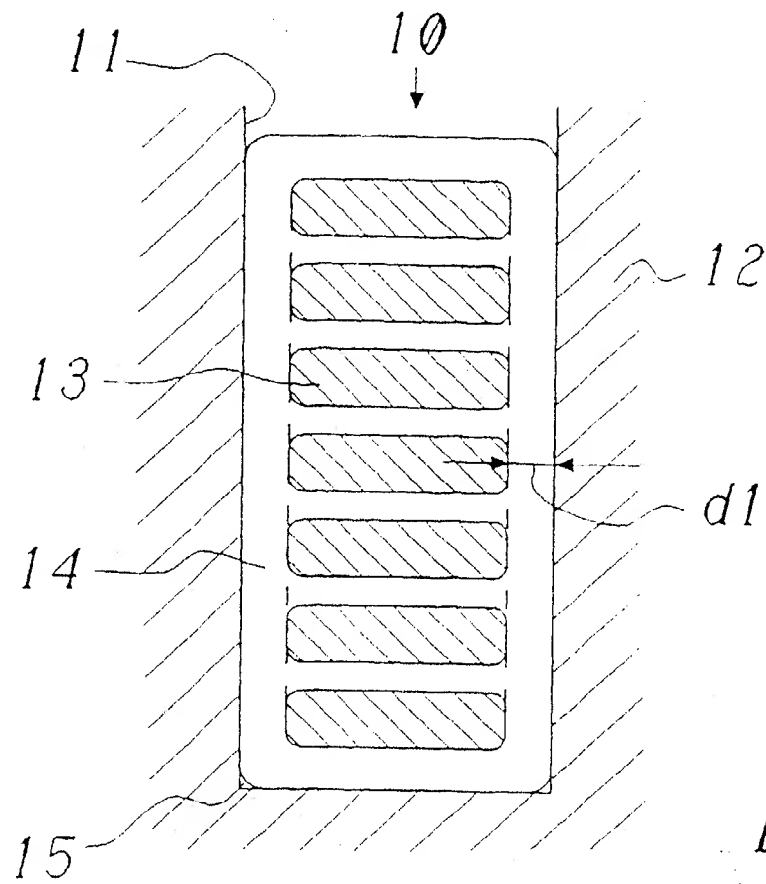


Fig. 3

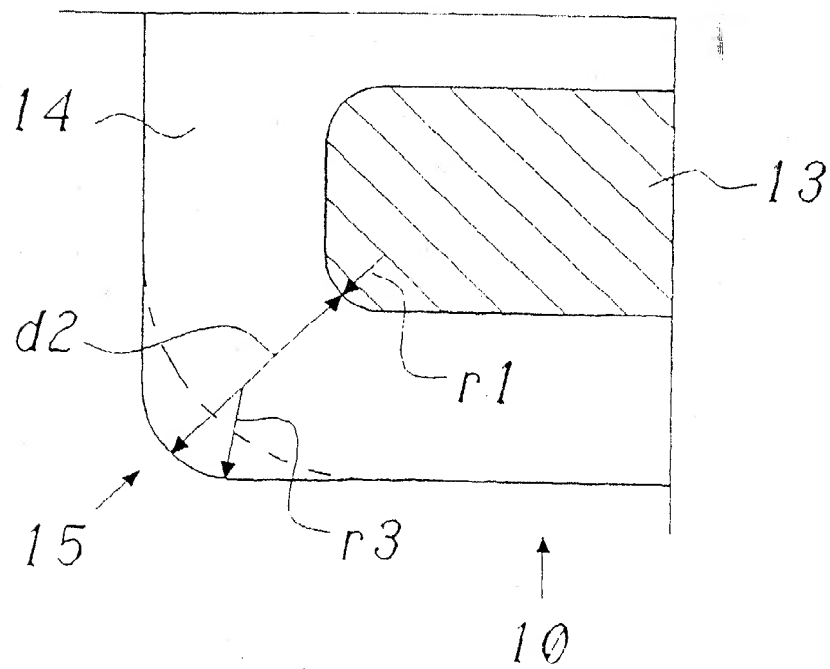


Fig. 4

